한국전문물리치료학회지 제9권 제1호
KAUTPT Vol. 9 No. 1 2002.

# 흰 쥐의 뒷다리 현수 후 집중 체중부하 트레드밀 훈련과 전기자극이 골격근 특성에 미치는 효과

안덕현
나사렛대학교 재활공학과
조상현, 이충휘
연세대학교 보건과학대학 재활학과 및 보건과학연구소
강호석
연세대학교 원주의과대학 해부학교실
권혁철
대구대학교 재활과학대학 재활과학과
김선엽
부산가톨릭대학교 물리치료학과

## Abstract

# Effects of Intensive Weight Bearing Treadmill Training and Electrical Stimulation on Skeletal Muscle Properties in Hindlimb Suspended Rats

Ahn Duck-hyun, Ph.D., P.T., O.T.
Dept. of Rehabilitation Technology, Korea Nazarene University
Cho Sang-hyun, Ph.D., M.D.
Yi Chung-hwi, Ph.D., P.T.
Dept. of Rehabilitation Therapy, College of Health Science, Yonsei University
Institute of Health Science, Yonsei University
Kang Ho-seok, Ph.D.
Dept. of Anatomy, Wonju College of Medine, Yonsei University
Kwon Hyuk-cheol, Ph.D., P.T., O.T.
Dept. of Rehabilitation Technology, College of Health Science, Taegu University
Kim Suhn-yeop, Ph.D., P.T., O.T.
Dept. of Rehabilitation Therapy, College of Health Science, Catholic University of Pusan

The purpose of this study was to investigate the treatment effect of three interventions on the disuse atrophy of rat hindlimb after two weeks suspension. Forty-eight 11~12 weeks old female Sprague-Dawley white rats were divided into four intervention groups: 1) suspension only (S; n=10), 2) intensive weight bearing treadmill (IWBT; n=10), 3) electrical stimulation (ES; n=9), 4) 2)+3) (ES/IWBT; n=9). Another 10 rats received no intervention or hindlimb suspension and served as

controls (C). After the interventions, 1) the cross-sectional area (CSA), 2) the ratio of white muscle fiber composition (WMFC), 3) isometric tetanic tension (ITT), and 4) muscle weights (MWs) were measured from the four calf muscle specimens. The results were as follows: 1. In all intervention groups, the CSAs of medial and lateral gastrocnemius (MG・LG), soleus (SOL), and flexor digitorum superficialis (FDS) decreased when compared to the control (C) group ($p<.05$). The CSA increased in FDS and LG for the IWBT group, in SOL for the ES/IWBT group compared to the S only group ($p<.05$). 2. The ratios of WMFC in MG, LG, SOL, and FDS increased compared to the C group for all interventions ($p<.05$). The ratios of WMFC decreased in SOL and LG for the IWBT group, in SOL for the ES/IWBT group compared to the S only group, and decreased in SOL for the ES/IWBT group compared to the IWBT group ($p<.05$). 3. The ITT in the MG, LG, SOL, and FDS decreased compared to the C group for all interventions ($p<.05$). The ITT increased in MG・LG/FDS, SOL, and the whole calf muscles (WCMs) in the IWBT, ES and ES/IWBT groups compared to the S only group ($p<.05$). 4. The MWs in MG・LG/FDS, SOL, WCMs decreased compared to the C group for all interventions ($p<.05$). The MWs increased in MG・LG/FDS and WCMs for the IWBT group, in SOL for the ES group, and in SOL for the ES/IWBT group compared to the S only group ($p<.05$). 5. In atrophied muscles, the IWBT group showed the best recovery and the ES/IWBT and ES groups followed in decreasing order. The most susceptible muscle to disuse atrophy was the SOL. But conversely, it showed the best recovery in the ES/IWBT group.

After two weeks of hindlimb suspension, the calf muscles of rats atrophied and their isometric tension decreased. These changes were best reversed by hindlimb-focused treadmill activity. The next best results were achieved by electrical stimulation combined with the treadmill followed by only electrical stimulation. These findings indicate that full weight bearing treadmill activity alone or in combination with electrical stimulation are effective treatments for non-weight bearing induced muscle atrophy. Further study of the effect of different intensities of electrical stimulation and variations in the duration period of full weight bearing treadmill activity on disuse atrophy is recommended.

**Key Words:** Disuse atrophy; Electrical stimulation; Intensive weight bearing; Suspension; Treadmill.

## Ⅰ. 서론

체중부하(weight bearing)는 근육의 구조와 기능을 유지하기 위한 중요한 자극 중에 하나이다(Hauschka 등, 1988). 체중부하의 중요성은 부동화(immobilization)를 통하여 체중지지가 없이 무활동을 만드는 지면에 기초한 모델(ground-based model)과 체중지지 없이 자유로운 움직임이 가능한 공간유영(spaceflight) 방법을 이용하여 강조되었다(Jaspers와 Tischler, 1984; LeBlanc 등, 1985; Morey-Holton 등, 1979; Templeton 등, 1984). 초기 연구에서 많이 사용되어진 모델은 석고붕대 고정(Booth와 Kelso, 1973), 탈신경(nerve resection)(Tomanek과 Lund, 1973), 관절 핀 고정(Max 등, 1971) 또는 건절제술(tenotomy)(고정식 등, 1995; 김진국 등, 1993; Magolis와 Baker, 1983; ) 등에 의해서 팔・다리를 고정시키는 방법이었다. 최근의 모

델은 Morey-Holton(1979)에 의해서 고안되어진 공간유영 방법으로, 쥐의 뒷다리를 들어 올려 지면에 발바닥이 닿지 못하도록 무체중부하 상태를 만들었으며, 전통적인 부동화 실험과 다르게 체중지지 없이 뒷다리를 자유롭게 움직이게 한다(Ohira 등, 1992; Thomason과 Booth, 1990).

뒷다리의 부동화와 현수 후에는 신경근 접합부에 감소된 운동단위 동원(recruitment)과 다리근의 위축을 나타냈다(Booth, 1982; Canon 등, 1998; Fell 등, 1985b; Jaspers와 Tischler, 1984; Stevens 등, 1990; Templeton 등, 1984; Witzmann 등, 1982). 특히, 골격근의 변화에서는 장딴지근(gastrocnemius), 가자미근(soleus), 긴발가락펴짐근(extensor digitorum longus)에 근 무게와 최대 등척성 장력의 감소를 나타냈다(Witzmann 등, 1982). 부동화와 현수 모델에서 근육 내의 섬유 양상(fiber type)은 체중지지의 손실에 서로 다른 민감성을 보였는데, 항중력근들에 많이 존재하는 느린 연축 적색근육섬유(slow-twitch type Ⅰ fiber)들이 빠른 연축 백색근육섬유(fast- twitch type Ⅱ fiber)보다 많은 영향을 받는다고 하였다(Fitts 등, 1986; Hauschka 등, 1988; Klitgaard 등, 1989; Musacchia 등, 1983; Roy 등, 1987; Taylor 등, 1992).

McDonald와 Fitts(1993)는 뒷다리 현수 후 가자미근의 변화를 조사한 연구에서 등척성 수축과 절반이완시간(half-relaxation time: ½RT)이 감소되는 반면, 최대 단축 속도(maximal velocity of shortening: Vo)와 미오신 발현(myosin expression)의 양은 증가하였다고 보고되었다(Diffe 등, 1991; Fitts 등, 1986; Gardetto 등, 1989). 또한 Alley와 Thompson(1997)은 이러한 체중부하의 손실은 하지 근 기능의 변화를 유발한다고 하였다.

유병기 동안 무활동이나 침상 휴식으로 여러 가지 기능의 변화, 특히 장딴지근과 가자미근 같이 중력에 대항하여 기립자세를 유지하는 근육들은 근 무게와 근력의 빠르고 유의할 만한 손실이 발생한다(Grindeland 등, 1985; Hikida 등, 1989). 이러한 불용성 근 무게의 손실은 근 단백질의 손상에 의해 발생하는데, 느린 단백질 합성, 빠른 단백질 분해, 또는 양 과정의 동시적 변화를 통해서 나타난다(Goldberg와 Goodman, 1969; Goldspink, 1977). 그 결과 감소된 가동성, 증가된 낙상의 위험과 낙상의 두려움 등을 갖게되고, 무활동성이나 침상 휴식을 선호하는 생활 양상의 변화가 나타나게 된다(Hikida 등, 1989).

근 위축과 골 위축은 미세중력(microgravity) 환경 안에 살고 있는 동안 발생된다. 그러나 인간을 대상으로 미세중력 환경 안에서의 연구는 현실적으로 가능하지 않다. 그러므로 동물연구에 기초한 많은 연구들이 모의의 무체중부하와 이것으로 수반되는 불용성 근 위축과 골 위축에 대하여 시행되어지고 있다(Alley와 Thompson, 1997; LeBlanc 등, 1985). 뒷다리 현수는 다리의 체중부하를 제거하여 무체중부하 상태를 만들어 다리에 근 발육을 제한하고 근 무게의 손실을 유발시킨다. 부동화 방법과 다르게 관절의 움직임을 허용하기 때문에 근 변화의 발생 기전이나 선택적인 이화반응(catabolic response)을 조절하는 방법이 다르다(Jaspers와 Tischler, 1984). 또한 뒷다리 현수 모델은 동물의 머리를 30~40°앞으로 구부리게 함으로서, 공간유형 동안 관찰되어지는 것과 유사하게 머리로 피가 모이는 현상이 나타나게 된다(LeBlanc 등, 1985).

꼬리 현수 후에 나타나는 현상들은 탈신경 처치를 받은 쥐와 다른 양상을 보이는데, 신경의 변성이 아닌 퇴행이 나타나고, 근 위축은 무용성이 아닌 무부하와 저운동(hypokinesia)에 의한 변화가 발생한다. 이러한 현상은 골절로 인한 휴식기를 필요로 하는 환자나 퇴행성 변화를 보이는 노인들에게 유사하게 나타난다(Alley와 Thompson, 1997; Mercier

등, 1999).

침상 휴식기 동안 사용되는 일반적인 물리치료 방법은 관절 구축을 예방하기 위한 관절가동역 운동, 근 위축을 예방하기 위한 전기자극 치료, 통증을 제거하기 위한 초음파 치료, 경피신경자극치료(TENS), 온습포 등과 바른 자세를 유지하기 위한 자세교정이다(Basford, 1998). 특히 하지손상 환자에게 근육의 기능을 유지하기 위한 체중지지 훈련은 중요한 물리치료 방법 중의 하나이다. 그러나 환자들에게 침상 휴식기 동안 또는 침상 휴식을 벗어난 후 물리치료사에 의해서 사용되어지는 치료의 종류, 빈도, 기간, 강도에 대한 효과들은 아직 정확하게 구명되어지지 않았다(Alley와 Thompson, 1997; Appell, 1990).

근육의 가소성(plasticity)을 연구한 Buller 등(1960)은 근육은 신경지배에 따라 다른 섬유양상을 보이며, 신경에 영향을 주는 가능한 기전은 변화에 대한 "명령(instruction)"으로, 이것은 외부 운동신경원에 의해 백색근육섬유와 적색근육섬유의 활동전위 전달이 다른 양상으로 만들어질 수 있다고 하였다. 이 이론은 빠른 운동신경원과 느린 운동신경원의 양상에 대한 연구에 많이 이용되었는데, 장기간 동안 신경을 통한 전기자극 또는 탈신경시킨 근육의 직접적 전기자극에 의해서 시행되었다(Eken과 Gundersen, 1988; Gorza 등, 1988; Lomo 등, 1974).

Sebille과 Bondoux-Jahan(1980)은 전기자극이 신경근 접합부를 보존하고 기능의 회복을 가속화한다고 하였다. 이 가설을 확인하기 위한 Pachter와 Eberstein(1983)의 연구에서 탈신경된 근육의 전기자극을 통해, 백색근육섬유와 적색근육섬유의 종판에서 열(cleft)과 주름(fold)의 후연접(postsynaptic) 부위가 유지됨을 보고하였다. 또한, Schimrigk 등(1977)은 전기자극이 근 활동에서 신경 재생 이전의 유해 효과를 제거하여 새로운 연접(synapse)을 형성한다고 하였다.

전기자극 시에 주파수의 중요성은 여러 연구자들에 의해서 논의되어졌는데, Al-Amood와 Lewis(1987)는 쥐의 장딴지근에 지속적인 10 Hz 자극은 느린 연축이 유지되어지는 반면, 간헐적 자극은 주파수에 상관없이 빠른 연축을 만든다고 보고하였다. Kernell 등(1987)은 고양이의 백색근육섬유인 긴종아리근(peroneus longus)에 고주파와 저주파의 간헐적 신경 자극 시 연축 기간이 느려지는 효과를 보고하였다. 그러나 높은 순간 주파수로 자극하게 되면 수축 특성을 백색근육섬유 방향으로 변화시키는 반면, 높은 강도의 자극은 적색근육섬유 방향으로 변화시킨다고 하였다(Eken과 Gundersen, 1988; Westgaard와 Lomo, 1988). Leterme과 Falempin (1994)은 장기간의 저주파 자극(chronic low frequency stimulation: CLFS)이 현수 10일 후에 유도된 섬유 양상 변화와 연축 역동학(twitch kinetics)을 보완하며, Canon 등(1998)은 현수 3주 후 장기간의 저주파 자극이 근 위축과 조직화학적 변화를 부분적으로 보완한다고 보고하였다.

한편, Appell(1990)은 조직의 손상이나 퇴행 후에 회복의 시기(time)와 양(amount)을 결정하는 것은 중요하다고 하였다. 신경 손상 후 회복의 시기를 결정하기 위한 검사법은 발가락 펴기 반사(toe-spreading reflex)를 사용하고(Sebille과 Bondoux-Jahan, 1980), 회복의 양을 결정하기 위해서는 등척성 근 장력의 측정을 사용할 수 있다(Gundersen과 Eken, 1992). 따라서 간접적인 외부 자극에 의해 유도된 근 장력은 기능적 회복 정도를 알 수 있는 지표가 된다(Eberstein과 Pachter, 1986).

근 위축은 무체중부하 동안 근육과 섬유양상 특이성(fiber-type-specific)에 의하여 발생한다(Jaspers와 Tischler, 1984). 빠른 당질분해 섬유(fast glycolytic [type IIa] fiber)나 빠른 산화-당질분해 섬유(fast oxidative-glycolytic

[type IIb] fiber)가 우세한 근육보다 느린 산화 섬유(slow oxidative [type I] fiber)를 포함한 근육에서 불용성 위축이 더욱 많이 발생한다(Chui와 Casleman, 1980; Unsworth 등, 1982). 그러나 이러한 반응은 근육의 기능과 밀접하게 연결되는데, 장딴지근과 가자미근 같은 발바닥펴짐근(plantar flexor)은 긴발가락펴짐근(extensor digitorum longus) 같은 발등굽힘근(dorsiflexor)보다 무체중부하 상태에서 더욱 손상된다(Chui와 Casleman, 1980; Morey-Holton과 Wronski, 1981).

이러한 손상을 회복하기 위하여 단기간의 체중지지(Hauschka 등, 1988; Pierotti 등, 1990; Thomason 등, 1987), 간헐적 가속(D'Aunno 등, 1990), 트레드밀 훈련(Graham 등, 1989) 또는 원심성 운동 훈련(Kirby 등, 1992)을 시행한 연구에서 장딴지근과 가자미근의 근 무게와 장력 발생이 부분적인 회복을 보였다고 하였다. 한편, Vogtmann과 Asmussen(1990)은 3주 현수 후 2주의 자연 회복기간 동안 조직학적 회복은 완전하게 되었으나, 수축 특성은 불완전하게 재생되었다고 하였다. 따라서 감소된 체중부하와 활동하에 발생되어지는 근 섬유 양상과 기능에 따른 차이 변화들은 각각의 회복 방법들에서 비교되어져야 한다.

본 연구의 가설은 무활동은 쥐의 골격근에 기능적 능력을 감소시키고, 이러한 감소된 기능은 섬유 양상 특이성(fiber-type-specific)을 보이며, 매일 수행되는 전기자극과 체중지지 훈련은 뒷다리 현수로 인해 근육에 발생하는 유해 효과를 감소시킨다는 것이다.

이 연구의 첫 번째 목적은 쥐의 뒷다리 현수 후에 각 중재에 따른 종아리근들의 단면적과 근 섬유 비율(백색근육섬유)의 변화, 그리고 장딴지근/얕은발가락굽힘근, 가자미근, 전체 종아리근의 등척성 강축 장력과 근 무게에 미치는 효과를 규명하는 것이다. 두 번째 목적은 쥐의 뒷다리 현수 후에 장딴지근, 가자미근, 얕은발가락굽힘근에 집중 체중부하 트레드밀 훈련(이하 트레드밀), 전기자극, 전기자극/집중 체중부하 트레드밀 훈련(이하 전기자극/트레드밀)이 골격근 특성에 미치는 영향을 비교하여 가장 적절한 치료법을 규명하는 것이다.

## Ⅱ. 연구방법

### 1. 실험대상 및 연구기간

본 연구는 연세대학교 원주의과대학 실험동물 사육실에서 사육된 생후 11~12주의 암컷 Sprague-Dawley 종(몸무게: 161.11~247.25 g, 평균: 200.86 g) 흰 쥐 48마리를 제공받아 연세대학교 자연과학대학 생명과학과 실험동물 사육실에서 실험하였다. 연구기간은 1999년 12월 17일부터 2000년 3월 5일까지였다.

### 2. 현수방법

현수 방법은 McDonald 등(1993)에 의해 고안된 꼬리 현수 방법을 기초로 본 연구의 목적에 적합하게 수정하여, 뒷다리가 실험기간 중 지면에 닿지 않도록 무체중부하 상태를 유지하도록 하였다(그림 1).

먼저 쥐를 움직이지 못하도록 고정틀에 고정시킨 후 꼬리의 몸쪽(proximal) ¼ 부위를 4×8 ㎝ 크기(가로×세로)의 가죽으로 덮고 그 위를 3×6 ㎝ 크기(가로×세로)의 철판으로 감싸고,

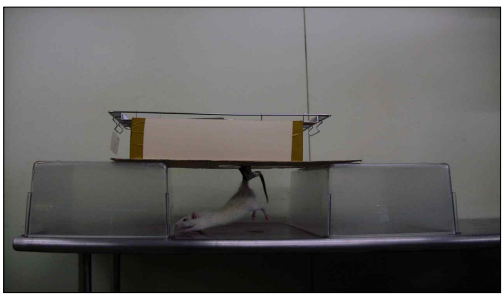

**그림 1.** 쥐의 현수 모델

철판의 위쪽 중앙을 천공기를 이용하여 구멍을 뚫은 후 삼각 고정쇠를 고정하였다. 케이지(cage)의 덮개 밑면에 길이가 10 ㎝인 레일(재질: 알루미늄)을 고정한 다음 잠금 장치가 있고 360° 회전 가능한 고리를 부착하였다.

회전고리에 쥐의 꼬리에 부착된 삼각 고정쇠를 연결하여 뒷다리가 현수되도록 유도하였고, 케이지의 높이를 조절하기 위해 30×10×10 ㎝ 크기(가로×세로×높이)의 종이 지지대를 케이지와 케이지 덮게 사이에 넣어 고정하였다. 길이조정이 가능한 철끈을 이용하여 현수 높이를 조절하였으며, 쥐가 케이지 밖으로 나오는 것을 예방하기 위하여 골판지로 중간 덮개를 제작하여 케이지 위를 덮어주었다.

반창고로 가죽 고정대와 꼬리의 연접 부위를 감아주어 접착력을 증가시켜 꼬리에서 가죽 고정대가 빠져나가지 않도록 하였다. 꼬리의 특정 부위에 지나친 압박이 가해지는 것을 피하기 위해 꼬리의 장축을 따라 부하가 분산되도록 유도하였고, 꼬리의 끝 부위가 분홍빛이 유지될 정도로 압박을 조절하여 적절한 혈액순환이 되도록 하였다.

실험기간 동안 삼양유지 제품의 쥐 사육용 사료를 사용하였고, 급수병을 통한 물 섭취를 허용하였다. 사육실의 실내 온도는 22 ℃를 유지하였고, 실험기간 도중 케이지 안에 보온과 위생을 위하여 깔짚(대패밥)을 깔아 주었으며, 쥐가 케이지 안에서 앞발을 이용한 자유로운 움직임을 허용하였다(그림 2).

**그림 2.** 쥐의 사육 모델

### 3. 실험 도구

본 연구에서 사용한 전기자극 기구는 SYS*STIMTM207[1]이며, 전극은 .5×1 ㎝ 크기(가로×세로)로 제작하였고, 전극 부착 전에 쥐를 바로 누운 자세로 가슴과 양 뒷다리를 반창고로 고정시켰다. 쥐 뒷다리에 전극을 부착시킬 부위의 털을 쥐용 자동 털깍기(클리퍼)를 이용하여 1차 털 제거 후 일회용 면도기로 2차 털 제거를 하였다. 전극은 전도용 겔(gel)을 바른 후 반창고를 이용해서 종아리 부위를 부착하였고, 다리의 움직임을 방지하기 위하여 반창고를 이용해서 무릎 부위를 고정판에 고정하였다.

등척성 강축 장력의 측정은 지면과 수평으로 유지하도록 고정대에 장력 측정기(force transducer)를 고정시키고, 근육에서 발생하는 신호를 처리할 수 있는 다용도 기록계(polygraph)의 일종인 MP100SWS[2]를 연결하여 개인용 컴퓨터에 그 결과를 저장하였다(그림 3). 마취 상태의 쥐를 해부판에 엎드린 자세로 앞·뒷발을 고정시킨 다음 종아리 근근의 발꿈치힘줄을 수술용 실로 묶고 팽팽하게 잡아당겨 장력 측정기에 연결하였다. 궁둥신경(sciatic nerve)에 전극을 부착하여 고정시킨 후 전기자극을 주어 근육의 등척성 수

**그림 3.** 장력 측정 장비

1) Mettler Electronic® Co., USA, 1990.
2) BIOPACK Systems, Inc., USA, 1997.

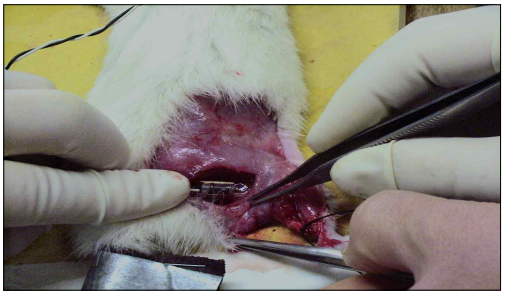

**그림 4**. 쥐의 궁둥신경에 전극 삽입 과정

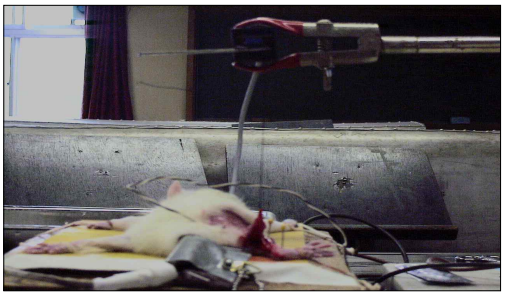

**그림 5**. 종아리근의 장력 측정 장면

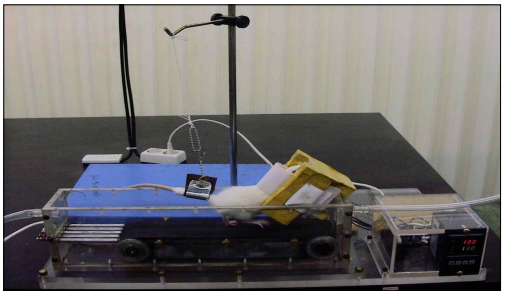

**그림 6**. 집중 체중부하 트레드밀 훈련 과정

축을 유발하였다(그림 4),(그림 5).

집중적 체중부하 훈련을 위해서는 자체 제작한 속도 조절이 가능한 쥐 실험용 트레 드밀(treadmill)을 사용하였다(크기: 40×80×20 ㎝[가로×세로×높이], 최고속도: 900 rpm, 경사도: 0%). 훈련기간 동안 쥐의 뒷다리만이 체중부하가 되도록 스티로폴을 이용하여 쥐 고정틀을 자체 제작하여 사용하였다. 훈련 중 트레드밀 안에서 꼬리의 짓눌림을 예방하기 위하여 고정대에 꼬리를 묶어주었다(그림 6).

조직사진을 인화하기 전에 광학현미경(light microscope)[3]을 이용하여 조직 염색 표본의 양호함을 확인하였고, 전자저울(Top Loading Balance)[4]을 이용하여 쥐의 체중과 근 무게를 측정하였다(허용오차: ±.001 g). 인화된 조직사진을 스캐너(scanner)로 읽어 들인 후 영상분석 프로그램(soft imaging system: SIS analysis®3.0)[5]이 내장된 영상분석기(image analyzer)의 ROIs (regions of interests) 기능을 이용하여 종아리근의 영역별 단면적과 근 섬유 비율을 측정하였다.

### 4. 실험 방법

총 48마리의 쥐를 실험군 38마리와 대조군 10마리의 두 집단으로 무작위 할당하였다. 뒷다리를 현수하지 않은 대조군은 케이지 안에서 자유롭게 움직이게 하였고, 실험군들은 치료 시간을 제외한, 활동 중이나 수면 중에 뒷발이 지면에 닿지 않도록 현수된 상태를 유지시켰다.

2주 동안 뒷다리 현수를 적용한 후 실험군을 다시 현수군 10마리, 트레드밀군 10마리, 전기자극군 9마리, 전기자극/트레드밀군 9마리로 각각 무작위 할당하였고, 각 중재(intervention)는 2주 동안 하루 2회 15분간 시행되었다. 현수군은 2주 동안(총 4주) 케이지 안에서 현수 만을 시행하였고, 트레드밀군은 앞발이 지지되지 않도록 고정틀에 고정 후 뒷다리만으로 쥐 실험용 트레드밀에서 130 rpm의 속도로 걷게 하였다. 전기자극군은 다시 무작위로 3마리씩 세 집단으로 나누었고, 똑바로 누운 자세로 양 뒷다리를 고정판에 고정 후 각각 2, 4, 6 volt (V)의 강도로 전기자극(교류, 20 Hz)을 15분 동안 적용하였다. 전기자극/트레드밀군은 무작위로 각각 3마리씩 세 집단으로 나누었으며 트레드밀에

3) Nikon Co., Japan, 1990.
4) Denver Ins., Co., USA, 1985.
5) SIS soft imaging system, GmbH, Germany, 1998.

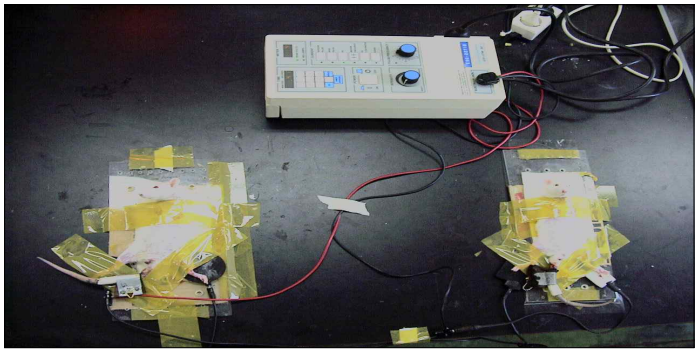

**그림 7**. 전기자극 과정

서 130 rpm의 속도로 15분 동안 걸은 다음, 현수된 상태로 충분한 휴식을 취하게 한 후 각각 2, 4, 6 V의 강도(20 Hz)로 양 뒷다리의 근육힘살(muscle belly) 부위에 각각 15분 동안 전기자극을 하였다(그림 7).

### 5. 조직 표본 작성

실험 시작 후 4주가 경과한 다음 총 48마리 쥐의 몸통에 염산케타민(5~10 ㎎/㎏ body weight, intraperitoneal)을 주사하여 쥐를 마취시킨 후 장력 검사측인 오른쪽 뒷다리를 제외한 나머지 다리들을 실로 묶어 해부판에 고정시켰다. 먼저 피부를 제거한 후 궁둥신경의 가지를 찾아 자체 제작한 0.5×1 ㎝ 크기(가로×세로)의 전기자극 전극을 부착한 다음 1×1 ㎝ 크기(가로×세로)의 절연체(재질: 비닐)로 감싸주어 주변 조직과 절연시켰다. 오른쪽 종아리근의 발꿈치힘줄(Achilles tendon)을 뼈로부터 분리하고 발꿈치힘줄을 실로 묶어 MP100SWS에 장력 측정기를 연결하여 등척성 강축 장력을 측정하였다(sampling rate: 200 Hz sample/second, total length: 5분). 그 다음 같은 다리의 장딴지근/얕은발가락굽힘근과 가자미근을 각각 분리하여 같은 방법으로 측정하였다.

장력 측정 후 반대측 뒷다리(왼쪽)를 절개하여 종아리근을 분리한 후 발꿈치힘줄을 실로 묶고 장딴지근의 양 쪽 이는곳(origin) 부분을 수술용 칼로 조심스럽게 절제하여 적출한 다음, 즉시 질소 냉동(-190 ℃ liquid nitrogen)을 하였다. 냉동된 근육의 가장 두꺼운 부분을 육안으로 확인한 다음 냉동 절편기(-20 ℃)를 이용해서 5 ㎛ 두께로 횡단면 절편을 만들었고, 그 중 가장 큰 것들을 육안으로 선정하여 15~20개의 조직 표본을 만들었다. 각 표본은 염색 전에 냉동 보관을 하여 조직의 손상을 최소화하였다.

### 6. 조직 염색

각 조직 표본을 코플린 병(coplin jar)에 넣고 incubating 용액(ATP, 0.1M glycine buffer with 0.75M CaCl2, pH 9.4)을 부은 후 1시간 30분 동안 37 ℃ 항온기에서 반응시켰다. 반응 후 증류수로 3~4회 세척하고 2% cobalt chloride 용액(Yakuri, Japan)을 넣어주어 1시간 동안 반응시켰다. 그 다음 다시 증류수로 3~4회 세척하고, 10% ammonium sulphide 용액(Merch, Germany)에 넣어 조직이 검은색으로 변색하는 것을 확인한 후 30분 동안 흐르는 물에 세척하였다. 세척을 마친 다음 유리용기에 담긴 ×50%, ×60%, ×70%, ×90%, ×100%의 알코올(Merch, Germany)에 순서대로 각각 3분씩 탈수하고, 계속해서 유리용기에 담긴 ×80%, ×90%, ×100%의 xylene (Duksan, Korea)으로 각각 5분씩 투명화하였다. 투명화 한 후 cover glass와 permount

(Fisher Scientific, USA)로 봉입한 후 하루 동안 건조시켜 조직 표본을 완성하였다.

### 7. 조직 표본 계측

사진 현상기에 조직 표본을 넣은 다음 13×10 ㎝ 크기(가로×세로)로 현상, 인화하였다. 인화된 사진들을 스캐너(ScanJet 4200 C)[6]로 읽어 들인 후 Photoshop 5.0 소프트웨어 프로그램으로 명암 변환(invert)시켜 그림 파일(BMP file)로 만들어 컴퓨터에 저장하였다. 각각의 그림 파일을 영상분석 프로그램(analySIS®3.0)으로 읽어 들인 후 안쪽·가쪽 장딴지근, 가자미근, 얕은발가락굽힘근의 단면적(㎟)과 섬유 양상(slow-twitch type Ⅰ fiber와 fast-twitch type Ⅱ fiber)의 백분율(%)을 측정하였다(그림 8).

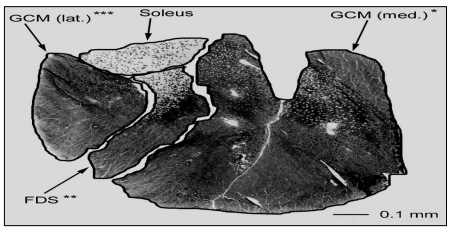


**그림 8**. 각 근육 영역별 분류(ROIs) (ATPase, pH 9.4)

* GCM (med.): 안쪽 장딴지근
** FDS: 얕은발가락굽힘근
*** GCM (lat.): 가쪽 장딴지근
흑색: 백색근육섬유
백색: 적색근육섬유

### 8. 분석 방법

측정된 자료가 정규분포를 하는지의 여부를 단일 표본 콜모고로프-스미르노프 검정법(one-sample Kolmogorov-Smirnov test)을 사용하여 분석하였고, 그 결과 정규분포를 하지 않아서 비모수 검정을 하였다. 현수군, 트레드밀군, 전기자극군, 전기자극/트레드밀군, 대조군에서 안쪽·가쪽 장딴지근, 가자미근과 얕은발가락굽힘근의 단면적과 섬유 양상의 백분율과 전체 종아리근, 가자미근, 장딴지근의 등척성 강축 장력 변화를 비교하기 위해서 크루스칼-왈리스 검정법(Kruskal-Wallis test)을 사용하여 통계분석 하였다.

종아리근에서 각 중재간의 단면적, 섬유 양상, 장력, 무게 차이 유·무를 알아보기 위하여, 각 집단간에 차이를 만-휘트니 검정법(Mann-Whitney test)을 한 다음, 계산된 p값을 비교의 수(k[k-1]/2=10, k=5[비교집단의 수])로 곱하는 본훼로니 수정법(Bonferroni's correction)을 사용하여 유의한 차이를 보이는 집단을 판별하였다(Portney와 Watkins, 1993). 이 연구에서 통계학적 유의성을 검정하기 위하여 유의수준 α는 .05로 정하였다.

## Ⅲ. 결과

### 1. 근 단면적의 변화

각 종아리근의 단면적은 중재군들(현수군, 트레드밀군, 전기자극군, 전기자극/트레드밀군)과 대조군을 비교한 결과, 안쪽·가쪽 장딴지근, 가자미근, 얕은발가락굽힘근 모두에서 유의하게 감소되었다($p<.05$),(표 1).

중재에 따른 각 근육들의 단면적 차이에 유·무를 알아보기 위하여 본훼로니 수정법(Bonferroni's correction)을 시행한 결과, 대조군과 비교하여 전기자극군, 전기자극/트레드밀군은 안쪽·가쪽 장딴지근, 얕은발가락굽힘근, 가자미근의 단면적이 유의하게 감소되었다($p<.05$). 또한 대조군과 트레드밀군의 비교에서는 안쪽 장딴지근, 가자미근의 단면적이 유의하게 감소되었다($p<.05$),(표 2).

한편, 현수군과 비교하여 트레드밀군은 얕은발가락굽힘근, 가쪽 장딴지근에서, 전기자극/트레드밀군은 가자미근의 단면적이 유의

6) Hewlett-Packard Co., USA, 1999.

표 1. 중재에 따른 종아리근의 단면적 변화 (단위: ㎟)

| 근육 | 현수군 (n=10) | 트레드밀군 (n=10) | 전기자극군 (n=9) | 전기자극/트레드밀군 (n=9) | 대조군 (n=10) | 계 (N=48) | $X^2$ | p |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 안쪽 장딴지근 | 34.01±4.15[a] | 35.24±5.32 | 34.83±3.61 | 36.81±7.33 | 52.14±7.32 | 38.61±5.28 | 23.69 | .00 |
| 얕은발가락 굽힘근 | 6.15±1.46 | 7.25±1.84 | 6.35±1.00 | 6.24±1.15 | 8.14±1.83 | 6.83±1.79 | 19.64 | .01 |
| 가자미근 | 1.93±.28 | 2.26±.46 | 2.12±.48 | 2.54±.64 | 4.44±1.43 | 2.66±1.32 | 21.90 | .00 |
| 가쪽 장딴지근 | 9.03±1.73 | 10.76±2.69 | 9.40±1.31 | 9.50±2.41 | 11.53±2.90 | 10.04±2.34 | 10.53 | .02 |

[a]평균±표준편차

표 2. 중재에 따른 근육별 단면적 변화의 유의성

| | 현수군 | 트레드밀군 | 전기자극군 | 전기자극/트레드밀군 | 대조군 |
|---|---|---|---|---|---|
| 현수군 | | ○ □ | | ◇ | ☆ ○ ◇ □ |
| 트레드밀군 | ○ □ | | | | ☆ ◇ |
| 전기자극군 | | | | | ☆ ○ ◇ □ |
| 전기자극/트레드밀군 | ◇ | | | | ☆ ○ ◇ □ |

☆: 안쪽 장딴지근 ○: 얕은발가락굽힘근
◇: 가자미근 □: 가쪽 장딴지근

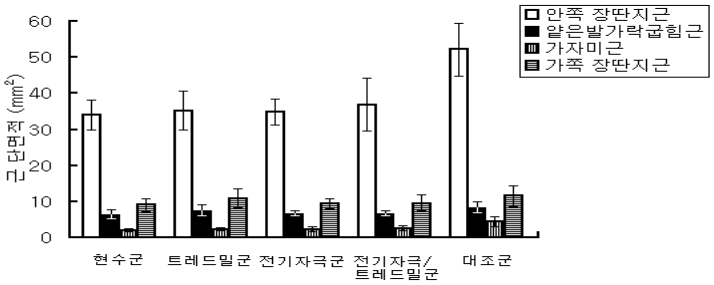


그림 9. 중재에 따른 종아리근의 단면적

하게 증가되었으며(p<.05), 이것은 트레드밀군과 전기자극/트레드밀군이 근 단면적의 감소를 최소화 할 수 있음을 나타낸다(그림 9).

## 2. 조직학적 소견

현수 후 중재에 따른 종아리근의 조직학적 변화를 관찰한 결과는 다음과 같다. 근 단면적은 대조군(그림 10)과 비교하여 모든 중재

군에서 안쪽·가쪽 장딴지근, 얕은발가락굽힘근, 가자미근이 감소되었다. 중재에 따른 종아리근의 변화는 현수군(그림 11)과 비교하여 트레드밀군(그림 12), 전기자극군(그림 13), 전기자극/트레드밀군(그림 14)에서 모든 종아리근의 단면적이 증가되었다.

근 섬유 비율은 대조군과 중재군 모두에서 안쪽·가쪽 장딴지근과 얕은발가락굽힘근은 백색근육섬유(그림에서 흑색)가 우세하였고, 가자미근은 적색근육섬유(그림에서 백색)가 우세하게 관찰되었다. 대조군(그림 10)과 비교하여 모든 중재군(그림 11),(그림 12),(그림 13),(그림 14)에 백색근육섬유의 발현이 증가되었다.

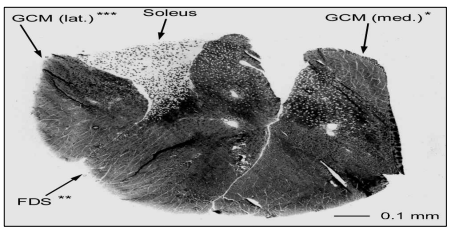


**그림 10**. 대조군의 근 단면
(ATPase, pH 9.4)

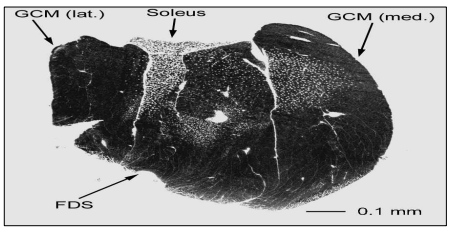


**그림 11**. 현수군의 근 단면
(ATPase, pH 9.4)
* GCM (med.): 안쪽장딴지근
** FDS: 얕은발가락굽힘근
*** GCM (lat.): 가쪽 장딴지근
[흑색: 백색근육섬유, 백색: 적색근육섬유]

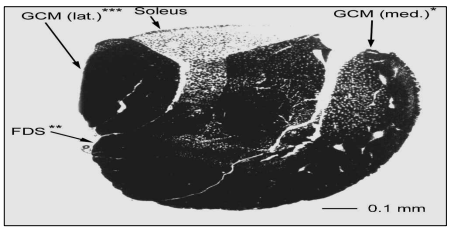


**그림 12**. 트레드밀군의 근 단면
(ATPase, pH 9.4)

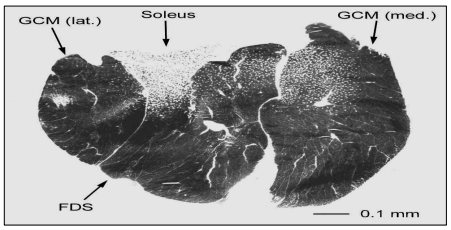


**그림 13**. 전기자극군의 근 단면
(ATPase, pH 9.4)
* GCM (med.): 안쪽장딴지근
** FDS: 얕은발가락굽힘근
*** GCM (lat.): 가쪽장딴지근

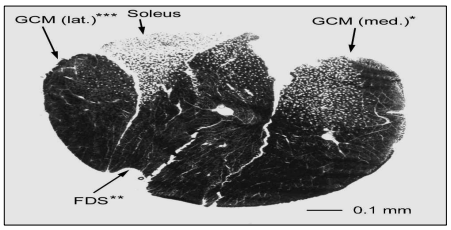


**그림 14**. 전기자극/트레드밀군의 근 단면
(ATPase, pH 9.4)
* GCM (med.): 안쪽 장딴지근
** FDS: 얕은발가락굽힘근
*** GCM (lat.): 가쪽 장딴지근

### 3. 근 섬유 비율의 변화

각 종아리근의 백색근육섬유 비율은 중재군들(현수군, 트레드밀군, 전기자극군, 전기자극/트레드밀군)과 대조군을 비교한 결과, 안쪽·가쪽 장딴지근, 얕은발가락굽힘근, 가자미근 모두에서 유의하게 증가되었다($p<.05$),

**표 3**. 중재에 따른 종아리근의 백색 근육섬유 비율 변화 (단위: %)

| 근육 | 현수군 (n=10) | 트레드밀군 (n=10) | 전기자극군 (n=9) | 전기자극/트레드밀군 (n=9) | 대조군 (n=10) | 계 (N=48) | $\chi^2$ | p |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 안쪽 장딴지근 | 95.23±1.48[a] | 94.17±3.76 | 94.71±2.50 | 94.21±2.08 | 93.64±1.02 | 94.39±2.48 | 6.56 | .03 |
| 얕은발가락 굽힘근 | 85.89±3.63 | 83.05±4.97 | 82.43±4.06 | 81.32±4.14 | 80.04±4.93 | 82.55±4.38 | 10.27 | .02 |
| 가자미근 | 7.35±1.05 | 5.87±1.44 | 6.30±2.48 | 6.86±2.79 | 5.39±2.80 | 6.35±1.89 | 8.94 | .01 |
| 가쪽 장딴지근 | 96.07± .85 | 93.10±4.45 | 93.78±1.04 | 94.24±1.51 | 92.51± .75 | 93.94±2.52 | 7.29 | .03 |

[a]평균±표준편차

(표 3).

중재에 따른 각 근육들의 백색근육섬유 비율 차이에 유·무를 알아보기 위하여 본훼로니 수정법(Bonferroni's correction)을 시행한 결과, 대조군과 비교하여 현수군은 모든 종아리근에서, 트레드밀군은 얕은발가락굽힘근에서, 전기자극군은 가쪽 장딴지근, 얕은발가락굽힘근에서, 전기자극/트레드밀군은 가자미근, 가쪽 장딴지근에서 백색근육섬유 비율이 유의하게 증가되었다($p<.05$),(표 4).

**표 4**. 중재에 따른 근육별 백색근육섬유 비율 변화의 유의성

| | 현수군 | 트레드밀군 | 전기자극군 | 전기자극/트레드밀군 | 대조군 |
|---|---|---|---|---|---|
| 현수군 | | ◇ □ | | ◇ | ☆ ○ ◇ □ |
| 트레드밀군 | ◇ □ | | | ◇ | ○ |
| 전기자극군 | | | | | ○ □ |
| 전기자극/트레드밀군 | ◇ | ◇ | | | ◇ □ |

☆: 안쪽 장딴지근 ○: 얕은발가락굽힘근
◇: 가자미근 □: 가쪽 장딴지근

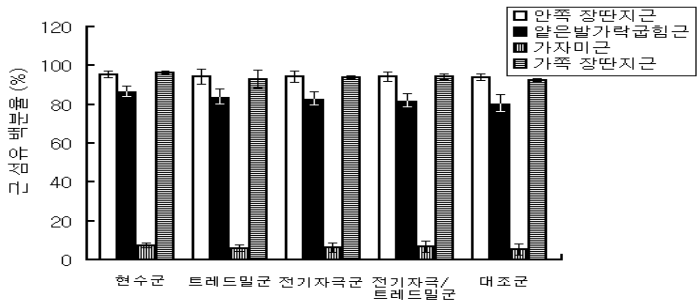


**그림 15**. 중재에 따른 종아리근의 백색근육섬유 비율

한편, 현수군과 비교하여 트레드밀군은 가자미근, 가쪽 장딴지근에서, 전기자극/트레드밀군은 가자미근에서 감소되었고, 트레드밀군과 전기자극/트레드밀군의 비교에서는 가자미근의 백색근육섬유 비율이 유의하게 감소되었다(p<.05),(표 4). 이것은 트레드밀군과 전기자극/트레드밀군이 대조군의 백색 근육섬유 비율에 유사해졌고, 적색 근육섬유의 비율이 증가하였음을 의미한다(그림 15).

### 4. 근 등척성 강축 장력의 변화

각 종아리근의 등척성 강축 장력은 중재군들(현수군, 트레드밀군, 전기자극, 전기자극/트레드밀군)과 대조군을 비교한 결과, 장딴지근/얕은발가락굽힘근, 가자미근, 전체 종아리근(whole calf muscle) 모두에서 유의하게 감소되었다(p<.05),(표 5).

중재에 따른 각 근육들의 등척성 강축 장력 차이에 유·무를 알아보기 위하여 본훼로니 수정법(Bonferroni's correction)을 시행한 결과, 대조군과 비교하여 현수군, 트레드밀군은 모든 종아리근에서, 전기자극군, 전기자극/트레드밀군은 가자미근에서 등척성 강축 장력이 유의하게 감소되었다(p<.05),(표 6).

한편, 현수군과 비교하여 트레드밀군, 전기자극군, 전기자극/트레드밀군은 장딴지근/얕은발가락굽힘근, 가자미근, 전체 종아리근 모두에서 등척성 강축 장력이 유의하게 증가되었다(p<.05). 이것은 트레드밀군, 전기자극군, 전기자극/트레드밀군의 장딴지근/얕은발가락

표 5. 중재에 따른 종아리근의 등척성 강축 장력 변화 (단위: ㎎)

| 근육 | 현수군 (n=10) | 트레드밀군 (n=10) | 전기자극군 (n=9) | 전기자극/트레드밀군 (n=9) | 대조군 (n=10) | 계 (N=48) | $X^2$ | p |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 장딴지근/얕은발가락 굽힘근 | 145.8±10.4[a] | 233.0±22.2 | 256.4±17.3 | 245.4±23.4 | 284.3±15.0 | 232.6±.6 | 18.25 | .00 |
| 가자미근 | 19.4±3.5 | 27.6±4.5 | 28.7±6.5 | 27.1±3.4 | 38.4±4.6 | 28.6±4.0 | 15.34 | .00 |
| 전체 종아리근 | 149.6±12.6 | 244.2±11.8 | 254.8±14.4 | 266.5±12.8 | 296.1±15.3 | 242.2±14.6 | 12.58 | .00 |

[a]평균±표준편차

표 6. 중재에 따른 근육별 등척성 강축 장력 변화의 유의성

| | 현수군 | 트레드밀군 | 전기자극군 | 전기자극/트레드밀군 | 대조군 |
|---|---|---|---|---|---|
| 현수군 | | ◎ ◇ ▽ | ◎ ◇ ▽ | ◎ ◇ ▽ | ◎ ◇ ▽ |
| 트레드밀군 | ◎ ◇ ▽ | | | | ◎ ◇ ▽ |
| 전기자극군 | ◎ ◇ ▽ | | | | ◇ |
| 전기자극/트레드밀군 | ◎ ◇ ▽ | | | | ◇ |

◎: 장딴지근/얕은발가락굽힘근 ◇: 가자미근
▽: 전체 종아리근

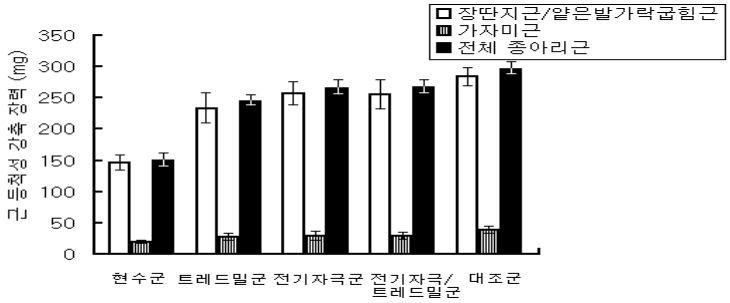


**그림 16**. 중재에 따른 종아리근의 등척성 강축 장력

**표 7**. 중재에 따른 종아리근의 무게 변화 (단위: g)

| 근육 | 현수군 (n=10) | 트레드밀군 (n=10) | 전기자극군 (n=9) | 전기자극/ 트레드밀군 (n=9) | 대조군 (n=10) | 계 (N=48) | $X^2$ | p |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 장딴지근/ 얕은발가락 굽힘근 | 1.01±.21[a] | 1.31±.16 | 1.17±.14 | 1.15±.12 | 1.41±.21 | 1.18±.21 | 26.88 | .00 |
| 가자미근 | .04±.02 | .05±.01 | .07±.02 | .06±.02 | .08±.02 | .06±.02 | 8.66 | .01 |
| 전체 종아리근 | 1.05±.22 | 1.29±.17 | 1.13±.14 | 1.18±.14 | 1.51±.22 | 1.23±.24 | 14.23 | .00 |

[a]평균±표준편차

굽힘근, 가자미근, 전체 종아리근 모두에서 등척성 강축 장력의 감소를 최소화 할 수 있음을 나타낸다(그림 16).

### 5. 근 무게의 변화

각 종아리근의 근 무게는 중재군들(현수군, 트레드밀군, 전기자극, 전기자극/트레드밀군)과 대조군을 비교한 결과, 장딴지근/얕은발가락굽힘근, 가자미근, 전체 종아리근(whole calf muscle) 모두에서 유의하게 감소되었다($p<.05$),(표 7).

중재에 따른 각 근육들의 근 무게에 차이 유·무를 알아보기 위하여 본훼로니 수정법(Bonferroni's correction)을 시행한 결과, 대조군과 비교하여 현수군은 모든 종아리근에서, 트레드밀군은 가자미근, 전체 종아리근에서, 전기자극군은 장딴지근/얕은발가락굽힘근, 전체 종아리근에서, 전기자극/트레드밀군은 장딴지근/얕은발가락굽힘근, 가자미근에서 유의하게 감소되었다($p<.05$),(표 8).

한편, 현수군과 비교하여 트레드밀은 장딴지근/얕은발가락굽힘근, 전체 종아리근에서, 전기자극군은 가자미근에서, 전기자극/트레드밀군은 가자미근에서 근 무게가 유의하게 증가되었다($p<.05$). 이것은 트레드밀군, 전기자극군, 전기자극/트레드밀군의 종아리근들이 근 무게의 감소를 최소화 할 수 있음을 나타낸다(그림 17).

### 6. 중재에 따른 근 특성별 변화

현수 후 근육별로 가장 많은 근 특성의 회복을 보인 중재는 트레드밀군이었으며 다음으로 전기자극/트레드밀군, 전기자극군 순 이었다. 전기자극군은 근 무게에서 가자미근이, 등척성 강축 장력에서 모든 종아리근이 대조군과 비교하여 현수 후 감소를 최소화하였다.

표 8. 중재에 따른 근육별 무게 변화의 유의성

| | 현수군 | 트레드밀군 | 전기자극군 | 전기자극/트레드밀군 | 대조군 |
|---|---|---|---|---|---|
| 현수군 | | ◎ ▽ | ◇ | ◇ | ◎ ◇ ▽ |
| 트레드밀군 | ◎ ▽ | | | | ◇ ▽ |
| 전기자극군 | ◇ | | | | ◎ ▽ |
| 전기자극/트레드밀군 | ◇ | | | | ◎ ◇ |

◎: 장딴지근/얕은발가락굽힘근 ◇: 가자미근
▽: 전체 종아리근

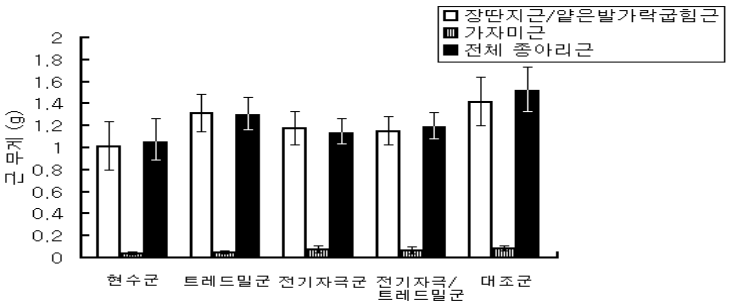


그림 17. 중재에 따른 종아리근의 무게

표 9. 중재에 따른 근 특성별 변화의 유의성

| 근 특성 | 트레드밀군 | 전기자극군 | 전기자극/트레드밀군 |
|---|---|---|---|
| 단면적 | ○ □ | | ◇* |
| 백색근육섬유 비율 | ◇* □ | | ◇ |
| 등척성 강축 장력 | ◎ ◇ ▽ | ◎ ◇* ▽ | ◎ ◇ ▽ |
| 무게 | ◎ ▽ | ◇ | ◇* |

☆: 안쪽 장딴지근 ○: 얕은발가락굽힘근
◇: 가자미근 □: 가쪽 장딴지근
◎: 장딴지근/얕은발가락굽힘근 ▽: 전체 종아리근
* : 대조군과 비교하여 최소한의 변화를 보임

또한 현수 후 가장 많은 근 특성의 감소가 있었던 근육은 가자미근이었으며, 중재 후 가장 많은 근 특성의 회복을 보인 근육은 전기자극/트레드밀군에서 가자미근이었다(표 9).

## Ⅳ. 고찰

근 위축은 근육을 사용하지 않거나 무체중 부하 상태에서 나타나는 현상이다(Appell,

1990; Booth와 Kelso, 1973; Fitts 등, 1986). 본 연구에서는 흰 쥐를 2주 동안 현수시킨 후 2주 동안에 현수, 트레드밀 훈련(15분), 전기자극(교류, 20 Hz, 각 15분), 전기자극/트레드밀 훈련(20 Hz, 각 15분/15분)의 중재에 따라서 근 특성의 변화를 알아보고, 근육별로 가장 적절한 근 위축의 치료법을 알아보고자 하였다. 연구결과는 현수 후 종아리근의 유해한 무체중부하성 근 변화가 나타났으며, 트레드밀군, 전기자극/트레드밀군 순으로 이러한 변화를 회복시키는데 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 현수 후 가자미근이 가장 많은 특성의 변화를 보였으며, 가자미근의 치료효과는 전기자극/트레드밀군이 가장 좋았다.

근육은 외상, 신경지배 손상, 무체중부하 등에 의하여 근육의 원활한 에너지대사가 이루어지지 못하게되고, 근육 세포에서 단백질의 분해가 합성보다 선행되어져서 근 위축이 나타난다. 이러한 근육의 변화를 측정하는 일반적인 방법은 근육의 단면적, 무게와 수축특성을 비교하는 것이다(Appell, 1990; Awad 등, 1974; Margolis와 Baker, 1983). 본 연구에서는 현수 후 변화되어지는 근육의 수축특성을 비교하기 위하여 등척성 강축 장력(isometric tetanic tension)을 측정하였으며(Carvalho와 McKee, 1996), 트레드밀군, 전기자극군, 전기자극/트레드밀군에서 장딴지근/얕은발가락굽힘근과 전체 종아리근의 장력이 대조군과 유사한 값을 보여, 근 장력의 유지에 있어 각 중재법이 치료의 효과가 있음을 나타냈다(표 5).

무체중부하를 만든 후 무용성 근 변화를 측정하기 위해 많이 사용된 연구디자인은 뒷다리 고정과 뒷다리 현수(저운동성) 방법으로 양 결과에서 신경근 접합부에 운동단위 동원(motor unit recruitment) 감소와 앞·뒷다리 근의 위축을 나타냈다(Booth, 1982; Fell 등, 1985; Jaspers와 Tischler, 1984; Templeton 등, 1984; Witzmann 등, 1982). 본 연구에서는 장기간의 침상 요양이나 가동성이 없는 환자들에게 나타날 수 있는 다리근의 조직변화와 유사한 반응을 보이는 뒷다리 현수 방법을 이용하였다(Alley와 Thompson, 1997). 현수 후 근 긴장의 경감은 근육미세섬유(myofilament)의 배열을 흩트리고 근원섬유를 변형시켜 근육의 기본 구조를 바꾸며, 사립체의 퇴행을 일으키고, 근육미세관 및 근육미세섬유의 양이 증가하여 이로 인한 근 수축과 근 조성에 변형을 유발한다(김진국 등, 1993; Trump와 Jones, 1979). 또한 시간경과에 따라 근 섬유수 대 모세혈관수의 비율과 한 개의 근 섬유를 싸고 있는 모세혈관수의 비율이 감소되어지는 반면, 공유모세혈관수는 증가한다(고정식 등, 1995). 이것은 근섬유의 양상이 적색근육섬유에서 백색근육섬유로 전환되어 졌음을 의미하는데, 본 연구에서 현수군의 백색근육섬유의 비율이 대조군과 비교하여 유의하게 증가된 것과 일치되는 결과이다(표 3).

무체중부하성 근 위축을 예방하거나 감소시키기 위해 사용되어지는 물리치료 방법들은 관절가동역 운동, 전기자극치료, 집중적 체중부하 훈련 등이 있다. 본 연구에서 전기자극은 근육을 수동적으로 흥분시켜 근육 내에 각 세포를 유지하기 위해 사용되었으며, Carvalho와 McKee(1996)의 연구에서 쥐의 가자미근과 긴발가락펴짐근(extensor digitorum longus)을 표면전극을 통하여 자극하기 위해서 70 V의 직류자극과 15 V의 교류자극을 사용하였다.

또한 Whitlock과 Terjung(1987)의 연구에서 동일 근육에 교류자극으로 6 V를, 직류자극으로는 60~100 V를 사용하였고, 쥐의 궁둥신경을 통하여 전기자극을 시행한 Meyer와 Terjung(1979)의 연구에서는 6~9 V의 교류자극을 사용하였다. 본 연구에서는 이전 연구에 기초하여 전기자극을 각각 세 군(기간: 15분, 강도: 2, 4, 6 V)으로 나누어 자극하였

으며, 각 군간에 근 단면적, 근 섬유 비율, 근 장력, 근 무게에 유의한 차이가 없어, 주어진 강도 차이간에는 근 특성의 변화가 없었다 (부록 참조).

Carvalho와 Mckee(1996)는 현수 후 근육에 간헐적 고주파 자극(intermittent high frequency stimulation: IHFS)의 적용은 빠른 연축 백색근육섬유보다 느린 연축 적색근육섬유에서 더 높은 수준의 회복이 되었다고 보고하였다. 그러나, Eken과 Gundersen(1988), Henning과 Lomo(1987)의 연구에서는 쥐의 종아리근에 일정한 저주파 자극이 근 수축 특성을 유지하였다는 연구 결과에 기초하여 본 연구에서는 20 Hz의 저주파로 자극하였다. 본 연구의 결과에서 가자미근은 현수군 대비 전기자극군에서 백색근육섬유의 가장 높은 감소율을 보였다(16.7%). 또한 가자미근에서 가장 높은 백색근육섬유의 감소율을 보인 중재군은 트레드밀군으로(현수군 대비 25.5%) 근 기능을 유지하는데 효과가 있었음을 알 수 있었다(표 3).

지속적인 운동의 반복은 모든 근 섬유가 비대되고 활성화되어지며, 또한 백색근육섬유가 적색근육섬유로 전환되어 변화된 환경에 적응해 가면서 에너지를 효율적으로 사용한다(Baumann 등, 1987; Green 등, 1984; Luginbuhl 등, 1984). 흰 쥐를 대상으로 한 지속적인 운동방법으로 Lynch 등(1991)은 수영을, Luginbuhl 등(1984)은 고강도 간헐적 훈련(high intensity interval training)을 사용하여 근 섬유의 변화를 비교하였다. 본 연구에서는 뒷다리의 집중적 체중부하를 위해 연동수 등(1988)의 연구에서 사용되어진 트레드밀(속도: 0.8 MPH, 경사도: 8%, 시간: 10~30분)에 기초하여 본 연구의 목적에 적합하도록 수정하여 사용하였고, 트레드밀을 적용한 두 군(트레드밀군, 전기자극/트레드밀군)에서 대부분의 근육들이 단면적, 섬유 비율, 무게, 장력에서 현수군과 유의한 차이를 나타내었으며, 대조군과 유사해지는 값을 나타내어 회복되는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 현수 후 근육별로 근 단면적의 감소를 최소화시키는 중재는 가쪽 장딴지근(대조군 대비 93.3%)과 얕은발가락굽힘근(대조군 대비 89.1%)에서는 트레드밀군이었고, 안쪽 장딴지근(대조군 대비 70.6%)과 가자미근(대조군 대비 57.2%)에서는 전기자극/트레드밀군이었다(표 1). 이것은 근 단면적의 감소를 위한 치료법으로 트레드밀과 전기자극/트레드밀이 시행되어질 경우 각 근육에서 현수로 인한 근 단면적의 감소를 최소화 할 수 있음을 나타낸다.

현수 후 근육별로 백색근육섬유 비율의 증가를 최소화시키는 중재는 안쪽 장딴지근(대조군 대비 100.6%), 가쪽 장딴지근(대조군 대비 100.6%), 가자미근(대조군 대비 108.9%)에서는 트레드밀군이었고, 얕은발가락굽힘근(대조군 대비 101.6%)에서는 전기자극/트레드밀군이었다(표 3). 이것은 근 섬유비율을 변화시키기 위한 중재로 전기자극, 트레드밀과 전기자극/트레드밀을 시행할 경우 각 근육에서 현수로 인한 적색근육섬유의 감소를 최소화 할 수 있음을 나타낸다.

현수 후 종아리근의 등척성 강축 장력의 감소를 최소화시키는 중재는 장딴지근/얕은발가락굽힘근(대조군 대비 90.2%), 가자미근(대조군 대비 74.7%) 에서는 전기자극군이, 전체 종아리근(대조군 대비 90.0%)에서는 전기자극/트레드밀군이었다(표 5). 이것은 종아리근의 등척성 강축 장력 감소에 대한 중재법으로 장딴지근/얕은발가락굽힘근과 가자미근에서는 전기자극군이, 전체 종아리근은 전기자극/트레드밀군이 효과가 있음을 나타낸다.

현수 후 종아리근의 무게의 감소를 최소화시키는 중재는 장딴지근/얕은발가락굽힘근(대조군 대비 92.9%), 전체 종아리근(대조군 대비 85.4%)에서는 트레드밀군이, 가자미근(대조군 대비 87.5%)에서는 전기자극군이었다

(표 7). 이것은 종아리근의 무게 감소에 대한 중재법으로 장딴지근/얕은발가락굽힘근과 전체 종아리근에서는 트레드밀군이, 가자미근에서는 전기자극군이 효과가 있음을 나타낸다.

쥐의 꼬리 현수 후 14일에 등척성 수축, 절반 이완 시간, 근 무게, 최대 강축 강도에 최대의 감소를 보인 연구(Fell 등, 1985; Fitts 등, 1986; Templton 등, 1984)에 근거하여 본 연구에서는 같은 현수 기간을 선택하였고, 동일 기간의 치료 기간을 주어 퇴행과 회복을 비교하였다. Musacchia 등(1983)은 1주 현수 후 장딴지근의 무게가 23.0% 감소되었고, 2주 후에는 더 이상의 큰 감소가 없었다고 하였으며, Roy 등(1987)은 4주 현수 후 안쪽 장딴지근의 근 무게가 28.8% 감소되었다고 보고하였다. 또한 가자미근에서 1주 현수 후 35.0%, 2주 현수 후 45.0%의 감소를 보였다고 하였다. 본 연구에서는 4주 현수 후 대조군과 현수군의 비교에서 장딴지근/얕은발가락굽힘근의 무게가 28.4%, 가자미근이 50.0%의 감소를 보여 유사한 양상을 나타냈다.

본 연구에서 현수 후 가자미근은 가장 많은 단면적(대조군 대비 56.5%)과 무게(대조군 대비 50.0%)의 감소를 보였는데 이것은 Appell(1990)의 연구 결과와 일치하는 결과이다. Musacchia 등(1983)은 2주 현수 후 근위축의 정도는 가자미근이 가장 컸으며, 장딴지근, 장신전근 순으로 그 크기가 작아졌다고 하였다. 본 연구에서는 총 4주 현수 후 대조군과 현수군의 근 무게 비교에서 유사한 결과인 가자미근, 전체 종아리근, 장딴지근/얕은발가락굽힘근의 순으로 나타났다.

또한 가자미근에서 전기자극 후 많은 근 무게의 회복을 나타냈는데(대조군 대비 87.5%), 가자미근에 장기간 동안의 전기자극이 근의 부조화를 대치 할 수 있다는 Brown 등(1983)과 Seedorf 등(1983)의 연구 결과와 일치하는 것이다. 본 연구에서 트레드밀군, 전기자극군, 전기자극/트레드밀군에서 백색근육섬유의 비율이 감소된 것은 중재 후에 적색근육섬유의 비율이 증가되어졌음을 나타낸다(표 3). 한편, Ariano 등(1973)의 연구에서는 가자미근에 백색근육섬유 비율이 16.0%라고 보고하였으나, 이것은 실험대상 쥐들의 선정 연령에 기인한 것으로 여겨진다(Fell 등, 1985).

근 위축의 중요한 발생요인은 일차적인 수분 손실과 성장 억제이며, 종(speices)에 따른 성장률 차이나 근 무게의 상대적 크기, 스트레스에 따라 발생 정도가 다르다고 하였다(Jaspers와 Tischler, 1984). 꼬리가 현수된 쥐는 심하게 스트레스를 받게되고 이로 인한 혈장 내에서 코르티코스테로이드(cortico-steroid)의 분비가 많아져 근 단백질의 이화작용을 손상시킬 수 있으며, 신체에 쌓인 요소(urea)의 처리를 위해 단백질이 사용되어지기 때문에 근육의 성장을 저해한다(Dohler 등, 1977). 즉 근육별 특성은 무체중부하 상태에서 장딴지근의 단백질 합성은 느리고, 분해는 상대적으로 빠르게 나타나 근육의 음적 질소 균형(negative nitrogen balance)을 만들어 근육의 성장 부실과 위축 같은 구조적 통합성에 변화를 나타낸다. 본 연구에서 모든 중재군과 대조군 사이에는 근 단면적의 유의한 차이가 있었으나, 중재법 사이에는 현수군과 트레드밀군, 전기자극/트레드밀군을 제외한 다른 집단들간의 비교에서 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이것은 중재 과정 중 환경 차이나, 특히 현수, 전기자극, 트레드밀과 같은 익숙하지 않은 양상이 각 치료의 효과를 경감시킨 것으로 여겨진다(Mercier 등, 1999).

본 연구에서는 뒷다리 현수에 의해 발생한 무체중부하성 근 조성 변화를 각 중재(트레드밀군, 전기자극군, 전기자극/트레드밀군)에 의해서 회복되는 효과가 있음을 알 수 있었다. 본 연구의 제한점은 실험용 쥐에게 발생되어지는 스트레스를 조절하지 못하여, 근 조직의 특성에 미치는 영향을 배제시키지 못한 점이다. 또한 생후 11~12주의 실험용 쥐들은

왕성한 성장기 기간이므로 정상적 발육에 따른 근 수축 특성, 단면적과 무게에 미치는 영향을 조절할 수 없었다. 특히 조직 염색 방법상으로 ATPase의 경우 중간섬유(inter mediate [ⅡA] fiber, 적색근육)의 구분을 할 수 없어, 상대적으로 백색근육섬유보다 적색근육섬유의 비율이 높게 나타났을 것이다. 또한 본 연구에서 사용되어진 조직 부위는 종아리근의 가장 두꺼운 부위인 근육힘살(muscle belly)로 근 전체의 성향을 모두 나타내는데는 제한이 있다. 따라서 이러한 요인들은 본 연구의 결과에 영향을 주었을 것으로 사료되며, 앞으로의 연구에서는 이들 제한 요인들의 조절을 통한 연구가 계속되어지고, 무체중부하성 근 변화의 치료에서 본 연구의 결과가 임상적 응용이 되어지기를 제안한다.

## Ⅴ. 결론

본 연구에서는 흰 쥐의 뒷다리를 2주 동안 현수시킨 후 2주 동안에 현수, 트레드밀(15분), 전기자극(교류, 20 Hz, 각 15분), 전기자극/트레드밀(교류, 20 Hz, 각 15분/15분)의 중재에 따라서 근 특성의 변화를 측정하였다. 또한, 근육별로 가장 적절한 근 위축의 중재법을 고안하기 위하여 안쪽·가쪽 장딴지근, 가자미근, 얕은발가락굽힘근의 단면적과 근섬유 비율의 변화와 장딴지근/얕은발가락굽힘근, 가자미근, 전체 종아리근의 등척성 강축 장력과 무게 변화를 비교하였다. 아데노신 삼인산가수분해효소(ATPase, pH 9.4)를 이용하여 조직을 염색하였고, 영상분석기(analysis ®3.0)와 장력측정장비(MP100SWS), 전자저울을 이용하여 조직의 특성 변화를 측정한 결과는 다음과 같다.

1. 근 단면적은 현수 후 모든 중재에서 네 개의 종아리근(안쪽·가쪽 장딴지근, 얕은 발가락굽 힘근, 가자미근)이 대조군보다 감소되었다($p<.05$). 현수군과 비교하여 트레드밀군은 얕은발가락굽힘근, 가쪽장딴지근에서, 전기자극/트레드밀군은 가자미근에서 단면적이 증가되었다($p<.05$).
2. 백색근육섬유 비율은 현수 후 모든 중재에서 네 개의 종아리근 대조군보다 증가되었다($p<.05$). 현수군과 비교하여 트레드밀군은 가자미근, 가쪽 장딴지근에서, 전기자극/트레드밀군은 가자미근에서 감소되었고, 트레드밀군과 비교하여 전기자극/트레드밀군은 가자미근에서 백색근육섬유 비율이 감소되었다($p<.05$).
3. 등척성 강축 장력은 현수 후 모든 중재에서 네 개의 종아리근이 대조군보다 감소되었다($p<.05$). 현수군과 비교하여 트레드밀군, 전기자극군, 전기자극/트레드밀군은 장딴지근/얕은발가락굽힘근, 가자미근, 전체 종아리근에서 등척성 강축 장력이 증가되었다($p<.05$).
4. 근 무게는 현수 후 모든 중재에서 네 개의 종아리근이 대조군보다 감소되었다($p<.05$). 현수군과 비교하여 트레드밀군은 장딴지근/얕은발가락굽힘근, 전체 종아리근에서, 전기자극군은 가자미근에서, 전기자극/트레드밀군은 가자미근에서 근 무게가 증가되었다($p<.05$).
5. 중재 후 근육별로 가장 많은 근 특성의 회복을 보인 중재는 트레드밀군이었으며, 다음으로 전기자극/트레드밀군, 전기자극군 순 이었다. 또한 현수 후 가장 많은 근 특성의 감소가 나타난 근육은 가자미근이었으며, 중재 후 가장 많은 근 특성의 회복을 보인 근육은 전기자극/트레드밀군에서 가자미근이었다.

본 연구의 결과 쥐의 뒷다리 현수 후 종아리근의 위축과 등척성 강축 장력 감소가 있었으며, 이러한 변화의 중재 효과는 트레드밀

군, 전기자극/트레드밀군, 전기자극군 순으로 높게 나타났다. 뒷다리를 집중적 체중부하시킨 트레드밀군은 모든 대상 종아리근에서 근위축과 감소된 장력을 개선시킬 수 있었으며, 전기자극/트레드밀군은 가장 많이 손실되어진 가자미근의 치료에 효과가 있었다. 따라서 무체중부하로 인한 근 변화의 치료에 집중 체중부하 트레드밀 훈련, 전기자극/트레드밀 훈련이 효과적이라고 사료된다. 앞으로의 연구에서는 이러한 근 변화의 치료 시 전기자극의 강도별 영향과 집중적 체중부하의 기간에 따른 영향에 대하여 비교해야 할 것이다.

## 인용문헌

고정식, 최기수, 양남길 등. 발꿈치힘줄이 절단된 흰쥐의 가자미근과 장단지근내의 모세혈관과 신경섬유의 형태학적 연구. 대한해부학회지. 1995;28:39-57.

김진국, 황상근, 양남길 등. 발꿈치힘줄이 절단된 흰쥐의 가자미근의 형태학적 연구. 대한해부학회지. 1993;26:297-305.

연동수, 황수관, 김인숙 등. 단련한 흰쥐의 속근 및 지근에 Glycogen 과저장이 운동지구력에 미치는 영향. 대한생리학회지. 1988;22:63-77.

Al-Amood WS, Lewis DM. The role of frequency in the effects of long-term intermittent stimulation of denervated slow-twitch muscle in the rat. J Physiol (Lond). 1987;392:377-395.

Alley KA, Thompson LV. Influence of simulated bed rest and intermittent weight bearing on single skeletal muscle fiber function in aged rats. Arch Phys Med Rehabil. 1997;78:19-25.

Appell HJ. Muscular atrophy following immobilisation: A review. J Sports Med. 1990;10:42-58.

Ariano MA, Armstrong RB, Edgerton VR. Hindlimb muscle fiber populations of five mammals. J Histochem Cytochem. 1973;21:51-55.

Awad EA, Ibrahim GA, Kottke FJ. Structural and chemical changes in rat muscle following tenotomy. Arch Phys Med Rehabil. 1974;55:193-197.

Basford JR. Physical agents. In: DeLisa JA, Gans BM. eds. Rehabilitation Medicine. 3rd ed. Philadelphia, Lippincott-Raven, 1998;483-503.

Baumann H, Jaggi M, Soland F, et al. Exercise training induces transitions of myosin isoform subunits within histochemically typed human muscle fibers. Pflugers Arch. 1987;409:349-360.

Booth FW. Effect of limb immobilization on skeletal muscle. J Appl Physiol. 1982;52:1113-1118.

Booth FW, Kelso JR. Production of rat muscle atrophy by cast fixation. J Appl Physiol. 1973;34:404-406.

Brown WE, Salmons S, Whalen RG. The sequential replacement of myosin subunit isoforms during muscle type transformation induced by long term electrical stimulation. J Biol Chem. 1983;258:14686-14692.

Buller AJ, Eccles, JC, Eccles RM. Interactions between motoneurones and muscles in respect of the characteristic speeds of their responses. J Physiol (Lond). 1960;150:417-439.

Canon F, Goubell F, Guezennec CY. Effects of chronic low frequency stimulation on contractile and elastic properties of hindlimb suspended rat soleus muscle. Eur J Appl Physiol. 1998;77:118-124.

Carvalho AJ, McKee NH. Simultaneous

assessment of isometric forces in fast-and slow-twitch muscles of single rat hindlimbs in situ. Can J Appl Physiol. 1996;21:23-34.

Chui LA, Casleman KR. Morphologic analysis of rat muscle fibers following space flight and hypogravity. Physiologist. 1980;23 :S76-S78. Suppl.

D'Aunno DS, Thomason DB, Booth FW. Centrifugal intensity and duration as countermeasure to soleus muscle atrophy. J Appl Physiol. 1990;69:1387-1398.

Diffee GM, Caiozzo VJ, Herrik RE, Baldwin, KM. Contractile and bio-chemical properties of rat soleus and plantaris after hindlimb suspension. Am J Physiol. 1991;260:C528-C534.

Dohler KD, Gartner K, von zur Muhlen A, Dohler U. Activation of anterior pituitory, thyroid, and adrenal gland in rats after disturbance stress. Acta Endocrinol. 1977;86:489-497.

Eberstein A, Pachter B. The effect of elec-trical stimulation on reinnervation of rat muscle: Contractile properties and endplate morphometry. Brain Research. 1986;384:304-310.

Eken T, Gundersen K. Electrical stimulation resembling normal motor-unit activity: Effects on denervated fast and slow rat muscles. J Physiol (Lond). 1988;402:651-669.

Fell RD, Gladden LB, Steffen JM, Musacchia XJ. Fatigue and contraction of slow and fast muscles in hypokinetic/hypodynamic rats. J Appl Physiol. 1985;58:65-69.

Fitts RH, Metzger DA, Riley DA, Unsworth BR. Models of disuse: A comparison of hindlimb suspension and immobilization. J Appl Physiol. 1986; 60:1946-1953.

Gardetto PR, Schluter JM, Fitts RH. Contractile function of single fibers after hindlimb suspension. J Appl Physiol. 1989;66:2739-2749.

Goldberg AL, Goodman HM. Relationship between cortisone and muscle work in determining muscle size. J Physiol (Lond). 1969;200:667-675.

Goldspink DF. The influence of immobilization and stretch on protein turnover of rat skeletal muscle. J Physiol (Lond). 1977; 264:267-282.

Gorza L, Gundersen K, Lomo T, et al. Slow-to-fast trans-formation of dener-vated soleus muscles by chronic high-frequency stimulation in the rat. J Physiol (Lond). 1988;402:627-649.

Graham SC, Roy RR, West SP, et al. Exercise effects on the size and metabolic properties of soleus fibers in hindlimb-suspended rats. Aviat Space Environ Med. 1989;60:226-234.

Green HJ, Klug GA, Reichmann H, et al. Exercise-induced fibre type transitions with regard to myosin, parvalbumin, and sarcoplasmic retinaculum in muscles of the rats. Pflugers Arch. 1984;400:432-438.

Grindeland RT, Fast M, Ruder M, et al. Rodent body, organ, and muscle weight responses to seven days of microgravity. Physiologist. 1985;28:375.

Gundersen K, Eken T. The importance of frequency and amount of electrical stimulation for contractile properties of denervated rat muscles. Acta Physiol Scand. 1992;145;49-57.

Hauschka EO, Roy RR, Edgerton VR.

Periodic weight support effects on rat soleus fibers after hindlimb suspension. J Appl Physiol. 1988;65:1231-1237.

Henning R, Lomo T. Effects of chronic stimulation on the size and speed of long-term denervated and innervated rat fast and slow skeletal muscles. Acta Physiol Scand. 1987;130:115-131.

Hikida R, Gollnick P, Dudley G, et al. Structural and metabolic characteristics human skeletal muscle following 30 days of simulated microgravity. Aviat Space Environ Med. 1989;60:664-670.

Jaspers SR, Tischler ME. Atrophy and growth failure of rat hindlimb muscles in tail-cast suspension. J Appl Physiol. 1984;57:1472-1479.

Kernell D, Eerbeek O, Verhey BA, Donselaar Y. Effects of physiological amounts of high- and low-rate chronic stimulation on fast-twitch muscle the cat hidlimb: Ⅰ. Speed-and force-related properties. J Neurophysiol. 1987;58:598-613.

Kirby CR, Ryan MJ, Booth FW. Eccentric exercise training as a countermeasure to non-weight-bearing soleus muscle atrophy. J Appl Physiol. 1992;73:1894-1899.

Klitgaard H, Marc R, Brunet A, et al. Contractile properties of old rat muscles: Effect of increased use. J Appl Physiol. 1989;67:1401-1408.

LeBlanc A, Marsh C, Evans P, et al. Bone and muscle atrophy with suspension of the rat. J Appl Physiol. 1985;58:1669-1675.

Leterme D, Falempin M. Compensatory effects of chronic electrostimulation on unweighted rat soleus muscle. Pflugers Arch. 1994;426:155-160.

Lomo T, Westgaard RH, Dahl HA. Contractile properties of muscle: Control by pattern of muscle activity in the rat. Proc R Soc Lond B. 1974;187:99-103.

Luginbuhl AJ, Dudley GA, Staron RS. Fiber type changes in rat skeletal muscle after intense interval training. Histochemistry. 1984;81:55-58.

Lynch GS, Stephenson DG, Williams DA. Endurance exercise effects on the contractile properties of single, skinned skeletal muscle fibres of young rats. Pflugers Arch. 1991;418:161-167.

Magolis RN, Baker JH. Ultrastructral and biochemical changes in rat soleus muscle following tenotomy. Anat Rec. 1983;206:239-245.

Max SR, Mayer RF, Vogelsang L. Lysosomes and disuse atrophy of skeletal muscle. Arch Biochem Biophys. 1971;146:227-232.

McDonald KS, Fitts RH. Effect of hindlimb unweighting on single soleus fiber maximal shortening velocity and ATPase activity. J Appl Physiol. 1993;74:2949-2957.

Mercier C, Jobin J, Lepine C, Simard C. Effects of hindlimb suspension on contractile properties of young and old rat muscles and the impact of electrical stimulation on the recovery process. Mech Ageing Dev. 1999;106:305-320.

Meyer RA, Terjung RL. Differences in ammonia and adenylate metabolism in contracting fast and slow muscle. Am J Physiol. 1979;237:C111-C118.

Morey-Holton ER, Sabelman EE, Turner RT, Baylink DJ. A new rat model simulating some aspects of spaceflight. Physiologist. 1979;22:S23-S24. Suppl.

Morey-Holton ER, Wronski TJ. Animal models for simulating weightlessness. Physiologist. 1981;24:S45-S48. Suppl.

Musacchia XJ, Steffen JM, Deavers DR. Rat

hindlimb muscle responses to suspension hypokinesia/hypodynamia. Aviat Space Environ Med. 1983;54:1015-1020.

Ohira Y. Jiang B, Roy RR, et al. Rat soleus muscle fiber responses to 14 days of spaceflight and hindlimb suspension. J Appl Physiol. 1992;73:S51-S57.

Pachter BR, Eberstein A. Endplate postsynaptic structure dependent upon muscle activity. Neurosci Lett. 1983;43:277-283.

Pierotti DJ, Roy RR, Flores V, Edgerton VR. Influence of 7 days of hindlimb suspension and intermittent weight support on rat muscle mechanical properties. Aviat Space Environ Med. 1990;61:205-210.

Portney LG, Watkins MP. Foundations of Clinical Research: Applications to practice. Connecticut: Appleton & Lange. 1993.

Roy RR, Bello MA, Bouissou P, Edgerton VR. Size and metabolic properties of fibers in rat fast-twitch muscles after hindlimb suspension. J Appl Physiol. 1987;62:2348-2357.

Schimrigk K, McLaughlin J, Gruninger W. The effect of electrical stimulation on the experimentally denervated rat muscle. Scand J Rehabil Med. 1977;9:55-60.

Sebille A, Bondoux-Jahan M. Effects of electric stimulation and previous nerve injury on motor function recovery in rats. Brain Research. 1980;193:562-565.

Seedorf K, Seeborf U, Pette D. Coordinate expression of alkali and DTNB myosin light chains during transformation of rabbit fast muscle by chronic stimulation. FEBS Lett. 1983;158:321-324.

Stevens L, Mounier Y, Holy X, Falempin M. Contractile properties of rat soleus muscle after 15 days of hindlimb suspension. J Appl Physiol. 1990;68:334-340.

Taylor AW, Noble EG, Cunningham DA, et al. Ageing, skeletal muscle contractile properties and enzyme activities with exercise. Med Sport Sci. 1992;37:109-125.

Templeton GH, Padalino M, Manton J, et al. Influence of suspension hypokinesia on rat soleus muscle. J Appl Physiol. 1984;56:278-286.

Thomason DB, Booth FW. Atrophy of the soleus muscle by hindlimb unweighting. J Appl Physiol. 1990;68:1-12.

Thomason DB, Herrick RE, Surdyka D, Baldwin KM. Time course of soleus muscle myosin expression during hindlimb suspension and recovery. J Appl Physiol. 1987;63:130-137.

Tomanek RJ, Lund DD. Degeneration of different types of skeletal muscle fibers: I. Denervation. J Anat. 1973;116:395-407.

Trump BF, Jones RT. Diagnostic Electron Microscopy. New York: John Wiley & Sons Inc., 1979.

Unsworth BR, Witzmann FA, Fitts RH. A comparison of rat myosin from fast and slow skeletal muscle and the effect of disuse. J Biol Chem. 1982;257:15129-15136.

Vogtmann M, Asmussen G. The recovery of contractile properties of the soleus muscle after suspension hypokinesia performed in young growing rats. Ergebn Exp Med. 1990;53:267-271.

Westgaard RH, Lomo T. Control of contractile properties within adaptive ranges by patterns of pulse activity in the rat. J Neurosci. 1988;8:4415-4426.

Whitlock DM, Terjung RL. ATP depletion in slow-twitch red muscle of rat. Am J Physiol. 1987;253:C426-C432.

Witzmann FA, Kim DH, Fitts RH. Hindlimb immobilization: Length and

contractile properties of skeletal muscle.
J Appl Physiol. 1982;53:335-345.

# 부록

## 전기자극군의 강도별 근 특성의 변화 결과표

표 10. 강도에 따른 종아리근의 단면적 변화 (단위: ㎟)

| 강도 / 근육 | 2 V (n=3) | 4 V (n=3) | 6 V (n=3) | 계 (N=9) | $X^2$ | p |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 안쪽 장딴지근 | 34.67±4.46[a] | 35.69±4.21 | 34.63±3.91 | 34.83±3.61 | 4.67 | .46 |
| 얕은 발가락굽힘근 | 6.24±1.56 | 6.67±2.92 | 6.21±2.12 | 6.35±1.00 | 2.00 | .85 |
| 가자미근 | 2.62±.48 | 1.12±.26 | 1.82±1.58 | 2.12±.48 | 7.33 | .20 |
| 가쪽 장딴지근 | 9.26±2.12 | 9.72±2.54 | 9.12±1.92 | 9.40±1.31 | 7.26 | .25 |

[a]평균±표준편차

표 11. 강도에 따른 종아리근의 백색근육섬유 비율 변화 (단위: %)

| 강도 / 근육 | 2 V (n=3) | 4 V (n=3) | 6 V (n=3) | 계 (N=9) | $X^2$ | p |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 안쪽 장딴지근 | 95.62±2.17[a] | 93.24±3.27 | 94.52±6.21 | 94.71±2.50 | 8.73 | .08 |
| 얕은발가락굽힘근 | 81.66±2.24 | 83.57±2.52 | 82.12±2.68 | 82.43±4.06 | 4.67 | .46 |
| 가자미근 | 6.29±1.27 | 6.44±2.65 | 6.32±1.78 | 6.30±2.48 | 3.62 | .62 |
| 가쪽 장딴지근 | 92.82±2.24 | 94.02±1.02 | 93.24±.98 | 93.78±1.04 | 4.52 | .51 |

[a]평균±표준편차

표 12. 강도에 따른 종아리근의 등척성 강축 장력 변화 (단위: mg)

| 강도 / 근육 | 2 V (n=3) | 4 V (n=3) | 6 V (n=3) | 계 (N=9) | $X^2$ | p |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 안쪽 장딴지근/ 얕은발가락굽힘근 | 244.4±14.2[a] | 272.6±15.3 | 249.6±18.9 | 256.4±17.3 | 5.92 | .55 |
| 가자미근 | 26.26±5.5 | 29.44±7.2 | 29.56±6.9 | 28.7±6.5 | 4.42 | .72 |
| 전체 종아리근 | 274.2±11.5 | 265.7±13.6 | 252.6±14.9 | 264.8±14.4 | 6.56 | .44 |

[a]평균±표준편차

**표 13**. 강도에 따른 종아리근의 무게 변화 (단위: g)

| 근육 \ 강도 | 2 V (n=3) | 4 V (n=3) | 6 V (n=3) | 계 (N=9) | $X^2$ | p |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 안쪽 장딴지근/ 얕은발가락굽힘근 | 1.26±.24[a] | 1.19±.11 | 1.05±.27 | 1.17±.14 | 2.21 | .82 |
| 가자미근 | .06±.03 | .08±.02 | .07±.02 | .07±.02 | 2.44 | .81 |
| 전체 종아리근 | 1.21±.29 | 1.07±.12 | 1.12±.26 | 1.13±.14 | 3.35 | .76 |

[a]평균±표준편차